

Jövőnk anyagai, technológiái

Rovatvezetők:
dr. Buzáné dr. Dénes Margit,
dr. Klug Ottó

DOBRÁNSZKY JÁNOS – MAGASDI ATTILA

Az alakemlékező ötvözetek alkalmazása

A cikk fő célkitűzése, hogy bemutassa az alakemlékező ötvözetek néhány jellegzetes alkalmazását, és ezen keresztül azokat a különleges tulajdonságokat, amelyek egyáltalán nem szokásosak a hagyományos szerkezeti anyagoknál. Az alkalmazások bemutatása elsősorban a fogyasztói társadalom egyes termékeire és az orvostechnikai alkalmazásokra tér ki, de bemutatja a robottechnikai és a földrengés elleni védelem egyes példáit is. A dolgozat első részében a szerzők összefoglalják az alakemlékező anyagok termomechanikus viselkedésére vonatkozó legalapvetőbb ismereteket.

Bevezetés

Az alakemlékező ötvözetek megnevezés azoknak a fémek anyagoknak a megjelölésére szolgál, amelyek a hőmérséklet változásának hatására képesek valamely előzetesen meghatározott alakot vagy méretet felvenni, ha megfelelő hőkezelésnek vetik alá őket. Relatív kis hőmérsékleten képlékenyen alakíthatók, majd egy relatív nagyobb hőmérsékleten visszanyerik az alakítás előtti alakjukat.

Az alakmemória jelenségének első megfigyelése Arne Ölander nevéhez fűződik [1]. Miként ő 1932-ben, Chang és Read is egy Au-Cd ötvözetet vizsgáltak 1950-ben a New York-i egyetemen, és

ugyancsak ők fedezték fel az In-Ti ötvözetek alakemlékező tulajdonságát is [2]. 1938-ban sárgarézben is megfigyelték a memóriajelenséget, ám széleskörű tanulmányozása csak 1962-től kezdődött, miután Buehler és társai teljesen véletlenül felfedezték a Ni-Ti ötvözetek alakemlékező tulajdonságát az USA tengerészeti tüzéségi kutatóintézetében (US Naval Ordnance Laboratory) [3]. Itt keresztelték el ezt az ötvözetet „nitinol” névre az alábbiak szerint:

Ni = Nikkel
Ti = Titán
N = Naval
O = Ordnance
L = Laboratory

Az alakmemória, ez a különleges mechanikai tulajdonság, a martenzites átalakulással áll szoros kapcsolatban, amely az alakemlékező ötvözetekben oda-vissza képes lejátszódni hevítéskor és hűtéskor, valamint mechanikai fel- és leterheléskor egyaránt. A martenzites átalakulás – Cohen meghatározásában [4] – egy rács-torzulással végbemenő, diffúzió nélküli fázisátalakulás, amelyben a nyírás dominál, és amelyhez oly módon társul egy alakváltozás, hogy a folyamat sebességét

és morfológiáját az alakváltozási energia határozza meg. Ha az alakváltozás a rugalmas tartományban marad, az átalakulást „termoelasztikusnak” nevezzük, és az anyagnak figyelemre méltó tulajdonságai lesznek: a szuperrugalmasság (másként: pszeudoelaszticitás), és az (egyutas, ill. a kétutas) alakmemória.

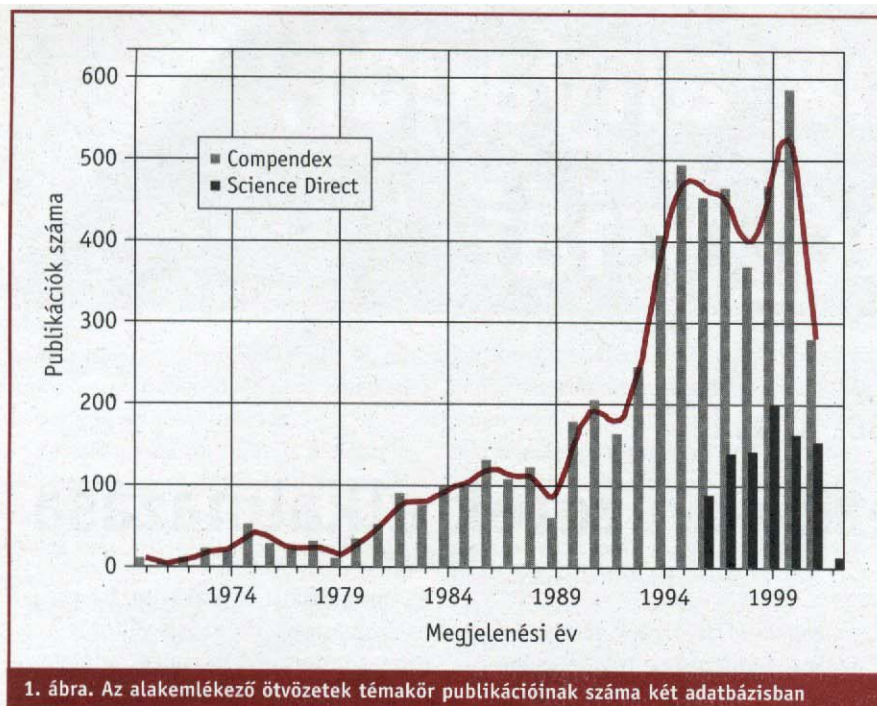
Az alakemlékező anyagok markánsan jelen vannak a „divatos” kutatási irányok között. Az 1999 májusában rendezett „Shape Memory Materials” szimpózium 107 dolgozatát a Materials Science Forum Series 327. kötetében jelentette meg a Book News Inc. kiadó (szerk: T. Saburi). 2001 szeptemberében, a kínai Kunming-ban nemzetközi konferenciát rendeztek „Shape Memory and Superelasticity Technologies and Shape Memory Materials” címmel. A „European Symposium on Martensitic Transformations and Shape Memory Alloys” nevű európai szimpóziumot már 5. alkalommal rendezték meg 2000 szeptemberében, Comóban, és a dolgozatokat a Journal de Physique IV közli.

A megvizsgált francia egyetemeken anyagtudománnyal foglalkozó tanszékeinek egyik tipikus tématerületét jelentik az alakemlékező ötvözetek, pl. az Ecole Nationale Supérieure de Chimie de Paris Szerkezeti Fémtechnológiai Laboratóriumában 1998 óta 5 doktori értekezést védtek meg az alakemlékező ötvözetek témakörében.

Az amazon.com amerikai elektronikus könyvtárház katalógusából 25 könyv választható a „shape memory” kategóriában. Ez ugyan jóval elmarad a „composite materials” témakör 949 címe mögött,

Dobránszky János az MTA-BME Fémtechnológiai Kutatócsoportban dolgozik tudományos főmunkatársként. Gépészmérnök, lapunk szerkesztője.

Magasdi Attila V. éves egyetemi hallgató a BME Gépészmérnöki Karán. II. éves kora óta végez tudományos diákköri munkát, melynek keretében eddig repülőgépronszok leleteinek vizsgálatával és szalagfűrészlapok hegeszthetőségével foglalkozott.



1. ábra. Az alakemlékező ötvözetek témakör publikációinak száma két adatbázisban

de csak alig kevesebb, mint a „stainless steel” címszóra kapott 98 könyvcím.

Ami a publikációs háttérrel illeti, az 1. ábra szemléletesen mutatja az alakemlékező ötvözetek témakör tudományos felfutását. Az ábrán két patinás publikációs adatbázis találatainak számát tüntettük fel a megjelenési év függvényében. Az adatok azt jelzik, hogy a dinamikus bővülés már lezárult – legalábbis a tudományos dolgozatok terén. Ugyanakkor, az Internet szinte kimeríthetetlen információforrást jelent e téren (is), pl. a *Yahoo! France* francia nyelvű böngészőn 1440 weblapot, az *Altavista* pedig a tetszőleges nyelvű keresési kérésre 7909 weblapot talált, amelyeken az *alliges à memoire de forme*, ill. a *shape memory alloys* kifejezés szerepel.

Magyarországon az 1970-es évek végén kezdtek el az alakemlékező ötvözetekkel foglalkozni. A Csepeli Színesfém-mű Cu-Al-Zn és Cu-Al-Ni ötvözeteket gyártott, és a debreceni KLTE Szilárdtestfizikai Tanszékén belső súrlódási vizsgálatokat folytattak ezekkel az anyagokkal. A Ni-Ti ötvözetek gyártási kísérletei nem voltak eredményesek. A Debreceni Egyetem említett tanszéke és a Miskolci Egyetem Fémtani Tanszéke néhány éve – francia partnerekkel közösen új kutatásokat kezdett. A BME Műszaki Mechanika Tanszékén doktori értekezés is született 2001-ben az alakemlékező ötvözetek modellezése témakörben. Más gépészka-

tanszékeken is végeztek elsősorban alkalmazástechnikai kísérleteket, pl. robotkarfejlesztést. A Vegyészmérnöki Kar Fizikai Kémia Tanszékén laboratóriumot alapítottak az intelligens anyagok (melyek egyik nagy csoportját képezik az alakemlékező tulajdonságú ötvözetek, kerámiák, polimerek és kompozitok) vizsgálatára, és az ELTE fizikusképzési tananyagában is helyet kaptak.

Az alakemlékező ötvözeteknek a hazai szakmai közvéleménnyel való megismertetését szolgáló legfontosabb publikációkat a Kohászati Lapok közölte. *Prohászka* professzor és *Kristyákné* dolgozata 1988-ban jelent meg [5], amikor az 1.

ábra szerint a nemzetközi érdeklődés is csak az éledezés szakaszában tartott. Nagyon értékes segítséget jelenthet a hazai érdeklődőknek *Hornbogen* professzor [6], valamint *Káldor* professzor és *Hidasi Béla* [7] cikke. Nagyon fontos, hogy az új tankönyvek egy része is kitér már az alakemlékező ötvözetekre, s így a hallgatóság

a tananyag keretében ismerkedhet meg az új anyagok eme csoportjával. Az utóbbi években egyre több híradás lát napvilágot a nem szakmai lapokban. Az Interneten teljesen kidolgozott egyetemi dolgozat is található [8].

Hazai fejlesztésű alkalmazásokról azonban szinte semmit nem lehet tudni, ezért is lehet hasznos az a nagyon esetleges válogatás, amelyet egy rövid, az alapismereteket tartalmazó összegzést követően mutatunk be.

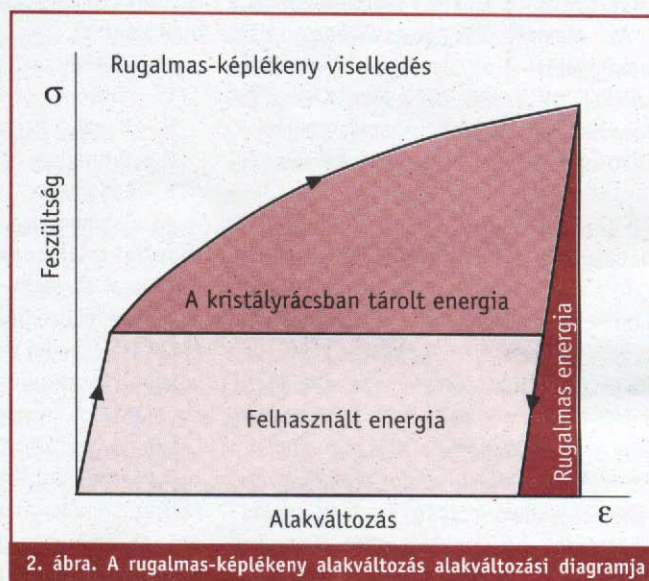
Az alakemlékező ötvözetek termomechanikus tulajdonságai

A klasszikus szilárd anyagok termomechanikus viselkedése

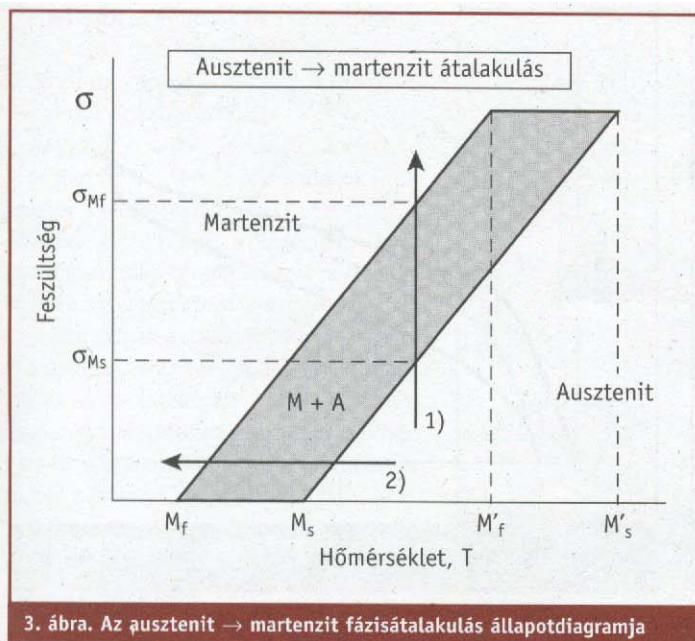
Az alakváltozásra képes klasszikus szilárd anyagok egyszerű alakváltozásai a következők:

- rugalmas alakváltozás
- képlékeny alakváltozás
- anelasztikus (viszkózus) alakváltozás.

Némely szilárd anyagok képesek akár egyidejűleg is az egyszerű alakváltozásokra, ezek a viszkoelasztoplastikus, elasztoplastikus stb. anyagok. Az említett alakváltozásokhoz kapcsolódik még a hőtágulás, azaz a lineáris termoelaszticitás. Az ideális képlékeny alakváltozásnál a külső erők munkája teljes mértékben az alakváltozásra használandó fel (disszipálódik, hővé alakul), míg az alakítási keményedéssel járó rugalmas-képlékeny alakváltozásnál a munka egy része a kristályrács szabadenergiáját növeli, pl. a diszlokációsűrűség növelésével (2. ábra) [9].



2. ábra. A rugalmas-képlékeny alakváltozás alakváltozási diagramja



3. ábra. Az ausztenit → martenzit fázisátalakulás állapotdiagramja

Az alakemlékező ötvözetek különleges tulajdonságai

Az alakemlékező ötvözetek alakváltozási jellemzői jelentősen eltérnek az az előbb bemutatottaktól. Termomechanikus tulajdonságaikat legjobban a fázisátalakulási állapotdiagram jellemzi. Annak függvényében, hogy milyen σ -T vonal mentén megy végbe hűtéskor az ausztenit → martenzit átalakulás, vagyis hogyan lépjük át a 3. ábrán az $M_s M'_s$ és $M_f M'_f$ vonalakat, egészen eltérő $\epsilon(\sigma)$, ill. $\epsilon(T)$ alakváltozások jöhetnek létre [9].

Ezek az alakváltozások öt fő csoportba sorolhatók:

1. Az első a szupertermoelaszticitás (másként: szuperrugalmasság vagy pszeudoelaszticitás), amely az a tulajdonsága az anyagnak, hogy nagy, több % mértékű, reverzibilis alakváltozásra képes. Két altípusa lehetséges. Az első altípus az izotermikus folyamat (a 3. ábrán, az állapotdiagramon az 1. nyíl jelöli), és általában ezt nevezik szuperrugalmasságnak. A másik altípus az állandó (nem nulla!) feszültségen végbemenő szupertermikus viselkedés (2. nyíl), amelyet gyakran neveznek – kissé pontatlanul – alakemlékezésnek. Az első altípust megvizsgálva, az alakváltozás (4. ábra) a σ_{M_s} értékig rugalmas [9]. A σ_{M_s} és σ_{M_f} közötti deformációt a jellemzően ikerképződéssel együtt járó martenzites átalakulás okozza. A σ_{M_f} -nél nagyobb terhelés a martenzites fázis képlékeny alakváltozását idézi elő. A leterhelési görbe ugyanolyan alakú, mint a felterhelési, de histerézissel ját-

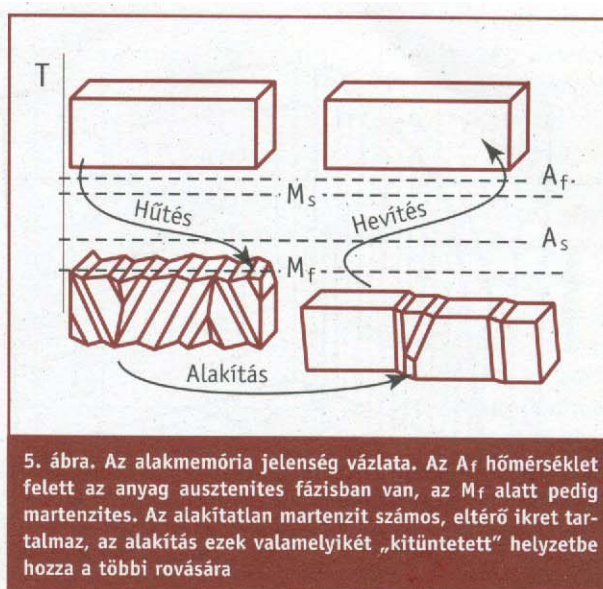
szódik le az ausztenites fázis visszaalakulása. A feszültség indexelésében az M, ill. az A az éppen keletkező fázisra utal, az „s” a kezdet (start), az „f” a befejeződés (finis) jele.

Az ϵ_{mrev} érték a maximális reverzibilis alakváltozás mértéke: egykristályoknál ez akár 10% is lehet, polikristályoknál 3–8%, és utóbbiaknál a görbe „töréspontjai” sem ilyen határozottak. Növekvő hőmérséklettel az egész alakváltozási hurok értelemszerűen felfelé tolódik.

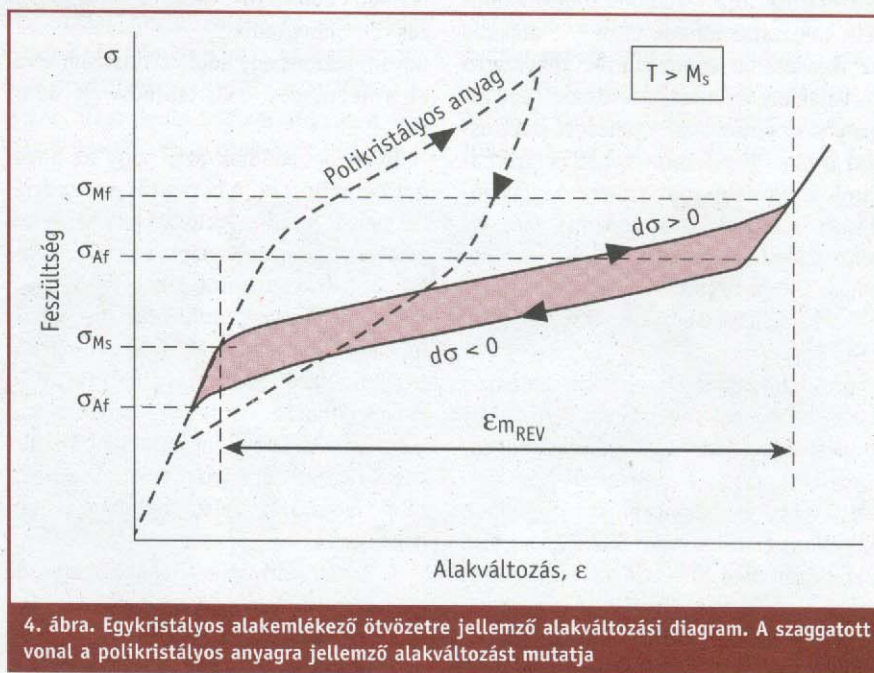
2. A második alakemlékezési jelenség az egyutas alakmemória, amely az olyan alakemlékező ötvözetek jellemzője, ame-

lyek csak hevítéskor mutatnak alakemlékező tulajdonságot. E viselkedés lényege, hogy a kis ($T < M_f$) hőmérsékleten alakított alkatrész az átalakulási hőmérsékletet átlépve visszanyeri eredeti alakját, adott esetben rövidül a hevítéskor (5. ábra) [10]. Az egyutas alakmemória termomechanikus ciklusát a 6. ábrán, a három paraméter változását (T , ϵ és σ) egyszerre tartalmazó diagramon mutatjuk be [9].

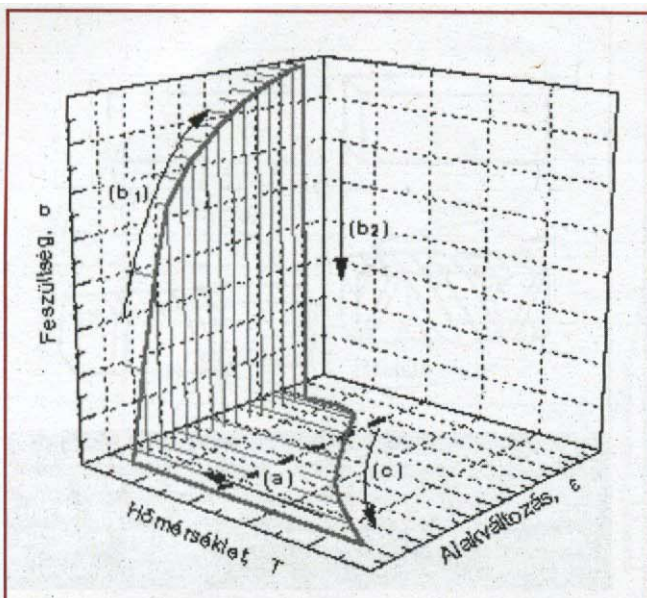
Ez a martenzites átalakulás különbözik a „hétköznapi” ötvözeteknél megismerttől. A fázisátalakulás egy reverzibilis alakváltozással jár együtt. Az ausztenit



5. ábra. Az alakmemória jelenség vázlata. Az A_f hőmérséklet felett az anyag ausztenites fázisban van, az M_f alatt pedig martenzites. Az alakítatlan martenzit számos, eltérő iker tartalmaz, az alakítás ezek valamelyikét „kítüntetett” helyzetbe hozza a többi rovására



4. ábra. Egykristályos alakemlékező ötvözetre jellemző alakváltozási diagram. A szaggatott vonal a polikristályos anyagra jellemző alakváltozást mutatja



6. ábra. Az egyutas alaklékezés termomechanikus ciklusa.

- (a) Hűtés az ausztenit \rightarrow martenzit átalakulási hőmérséklet alá; terhelés = 0
- (b₁) Állandó hőmérsékleten ($T < M_f$) növekedik a terhelés; a martenzit rács átrendeződik
- (b₂) Változatlan hőmérsékleten 0-ra csökken a terhelés
- (c) Terhelés=0; hevítés martenzit \rightarrow ausztenit átalakulási hőmérséklet (A_f) fölé

többféleképpen is át tud alakulni martenzitté, mivel ez utóbbi fázis szerkezete kisebb szimmetriát mutat, ugyanakkor a martenzit csak egyféleképpen alakulhat át ausztenitté. Voltaképpen ez a körülmény az alaklékezési tulajdonság alapvető lényege.

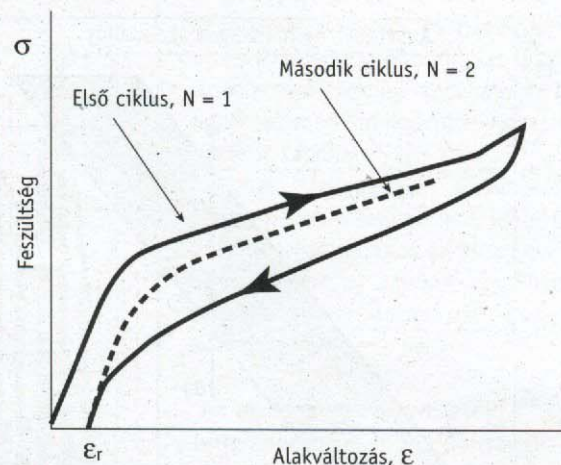
Az ausztenites fázisból való hűtésekor az ikresedett martenzitnek – a habitussíkok orientációja szempontjából – különféle változatai jönnek létre. Az alakítás az ikerhatárok elmozdulását kényszeríti ki, valamely kitértetett változat (egy bizonyos orientációval jellemzett habitus-sík) javára. Végső soron tehát, az ikerhatárok elmozdulásából származó alakmódosulás eredete a martenzites rács kisebb szimmetriájában található. Amikor helyreáll a nagyobb szimmetriájú ausztenites rács, a korábbi alakváltozásnak el kell tűnnie.

3. A harmadik alaklékezési jelenség a kétutas alakmemória. A már bemutatott szupertermoelaszticitás csak első közelítésben tekinthető alaklékezési viselkedésnek egy termomechanikus ciklusban. A gyakorlati tapasztalat szerint, az első ciklus után nem áll vissza az eredeti alak, egy ϵ_r maradó alakváltozás mérhető a darabon (7. ábra) [9]. Kiváltó okai az anyag belső szerkezetváltozásaival függnek

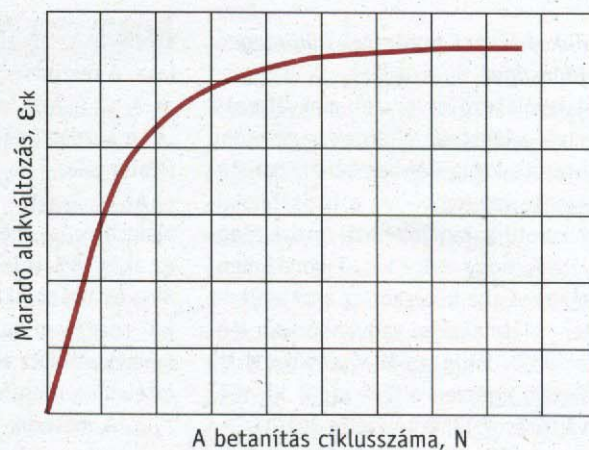
össze: maradék martenzit képződése, diszlokációs-sűrűség növekedése. Amennyiben többször megismétlik a termomechanikus ciklust, az összegzett ϵ_r maradó alakváltozás növekedik ugyan, viszont egy adott ciklusszám körül ez a növekedés leáll, telítődik (8. ábra) [9].

Ilyenkor mondják azt, hogy az anyagot betanították. A betanítás egy speciális belső feszültségeloszlást hoz létre, amely mindig ugyanazt a martenzites átalakulási változatot biztosítja. Ebből adódóan egy egyszerű, külső feszültség nélküli hűtés is kiváltja az átalakulás okozta alakváltozást. Ez a kétutas alakmemória-hatás megfelel a szupertermikus viselkedésnek, ám az ottani állandó külső feszültséget jelen esetben a betanítás létrehozta belső feszültségek helyettesítik.

4. A negyedik alaklékezési jelenség a gumiszerű viselkedés. A belső fázishatárok és ikerhatárok mozgása a feszültségtől függően lehet reverzibilis és irre-



7. ábra. A csak részleges alakvisszanyerés miatti maradó alakváltozás szemléltetése



8. ábra. Az összegzett maradó alakváltozás telítődése a ciklusszám függvényében

verzibilis. Amennyiben a mozgás reverzibilis, a makroszkopikus alakváltozás egy rugalmas alakváltozásból és egy reverzibilis határfelület-mozgásból tevődik össze, amely adott esetben nagyobb, mint a közönséges rugalmas tag. Ilyenkor beszélünk az anyag gumiszerű viselkedéséről.

5. Az ötödik alaklékezési jelenség a csillapító hatás. A mechanikai csillapítást, közismert nevén a belső súrlódást az okozza, hogy a mechanikai energia irreverzibilis módon alakul át hővé. Az alaklékező anyagoknál háromféle, jelentősen eltérő belső súrlódási érték valósulhat meg.

– ausztenites állapotban a belső súrlódás a reverzibilis diszlokációmozgás eredménye, a csillapítási tényező: $1/Q \sim 10^{-4}$,

- martenzites állapotban a csillapítást a martenzit-martenzit határfelületek reverzibilis mozgása okozza, $1/Q \sim 10^{-3}$,
- s végül a fázisátalakulás közben a legnagyobb a belső súrlódás, amikor az ausztenit-martenzit fázishatárok mozgása a meghatározó: $1/Q \sim 10^{-2}$.

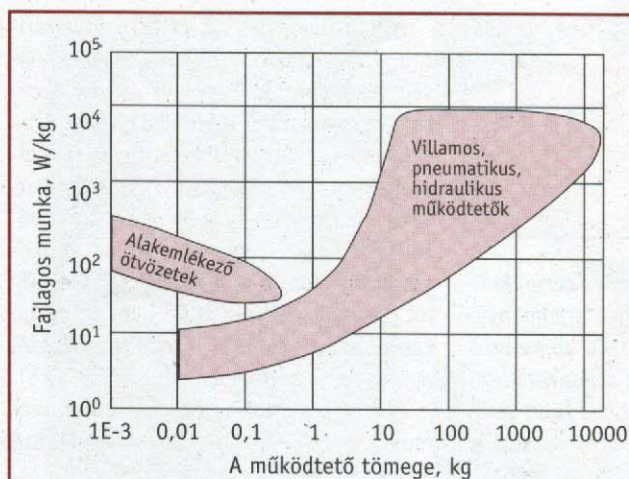
Azzal zárjuk ezt a szakaszt, hogy hangsúlyozzuk: rendkívül sok olyan kérdésről nem beszéltünk, amelyek szorosan hozzátartoznak az alakemlékező anyagok (ötvözetek, kerámiák, polimerek, kompozitok) mint intelligens anyagok alaposabb megismeréséhez, de célunk elsősorban az alkalmazások egy felvillantásszerű bemutatása.

Az alakemlékező ötvözetek alkalmazási példái

1969-ben Ni-Ti ötvözetből készítették az F-14 vadászbombázó csőcsatlakozó elemeit. Gépenként kb. 1000 alkatrészt építettek be, és mintegy 1000 db gép készült. Ezt tekinthetjük az áttörésnek a (hadi)ipari alkalmazások terén. Ezt követően, ezeket a különleges mechanikai tulajdonságú anyagokat számos területen hasznosították, az ürrepüléstől az orvostechnikáig, a játékgyártástól a földrengés elleni védelemig. 1990-ben 30 millió USD-ra becsülték ezen anyagok piacát [11], s azóta évi 25%-os növekedést mutatnak ki, tehát 10 év alatt mintegy tízszeresére növekedett ez a piac.

1. Szemüvegkeretek, telefonantennák

A szemüvegkeretekhez, telefonantennákhoz az alakemlékező ötvözetek szuperrugalmas tulajdonságát használják ki. A jelentős szilárdsággal a műanyagokét meghaladó hajlékonyság párosul. A szemüveg szárát és a nyergét, ill. a telefonan-



9. ábra. Az alakemlékező ötvözetek és a hagyományos működtetők fajlagos „ereje” a tömeg függvényében

tennát szinte az ujjá köré csavarhatja a gazdája [12]. A szemüvegkeret a magyar szaküzletekben is évek óta kapható (jelenleg kb. 60 eft áron).

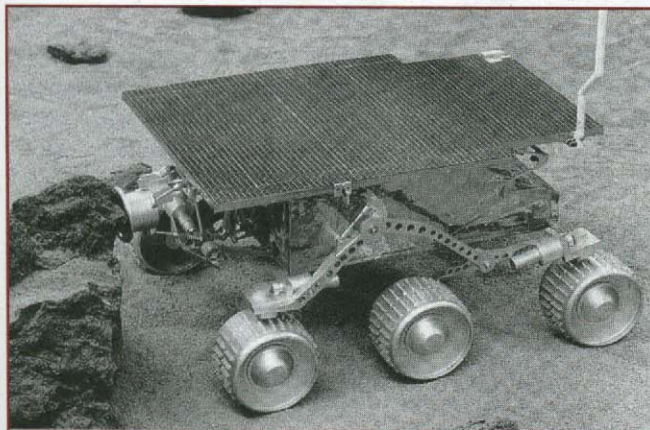
2. Működtető elemek (aktuátorok) a robottechnikában

A robottechnika kiemelt figyelmet kap az űrkutatásban, és e téren alapvető szerepet kapnak az alakemlékező ötvözetek. Belőlük készülnek a megfogószerkezetek, karok, bicepszek, tricepszek. A robotépítésben kulcsfontosságú ún. „izomhuzalok” („Muscle Wires”) egyik fő gyártója a Dynalloy Inc. Ezek a furcsa nevű drótok voltaképpen Ni-Ti huzalok, és „Flexinol” márkanéven, két fő típusban készülnek: az egyiknek 70°C, a másiknak 90°C az átalakulási hőmérséklete (a hevítésnél érdekes A_s hőmérséklet). Az összehúzó-dást eredményező hevítést az átfolyó villamos áram Joule-hőjével végzik, a hűtést a levegő, ill. a környezet biztosítja.

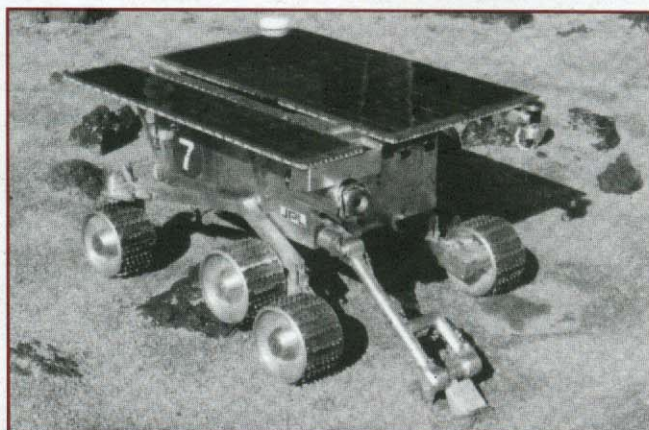
A működtetők (aktuátorok) céljára való felhasználást szemléletesen világítja meg a 9. ábra, amelyen összevethető a hagyományos (villamos, pneumatikus és hidraulikus) működtető szerkezetek és az alakemlékező ötvözetből készített hasonló szerepű szerkezeti elemek fajlagos teljesítménye, vagyis az egységnyi tömeggel

elvégezhető munka [10]. Nehezen eltűlozható jelentősége van annak, hogy pl. egy 10 gramm tömegű memóriafémmel akár 2 watt munkát is el lehet végeztetni, míg egy ugyanekkora villamos hajtású motor jó esetben is csak a tizedére képes.

A kivételes tulajdonságoknak azonban ára van, amely elsősorban a nagyon költséges és nehéz gyártással magyarázható. A Selectronic, a Dynalloy gyártotta „Flexinol” huzalok franciaországi forgalmazója. 1 méter huzal árára mutat néhány példát a 1. táblázat [13]. A közölt árak rendkívül magasnak mondhatók, viszont a robottechnika számára ezek az anyagok pótolhatatlan megoldást jelentenek, és segítségükkel látványos sikereket mutatott fel ez a szakma. A 10.a ábra a Sojourner robotjármű képét mutatja, amelyet a Pathfinder űrhajó vitt a Marsra. A Rocky 7 látható a 10.b ábrán, amely a 2003-as expedíció prototípusa [14].



10.a ábra. A Sojourner robotjármű



10.b ábra. A Rocky 7 robotjármű

1. táblázat

A Flexinol huzalok ára, euro/méter

Átmérő	70 °C-os huzal	90 °C-os huzal
0,05 mm	15,00	27,00
0,10 mm	14,50	14,50
0,15 mm	14,50	14,50
0,25 mm	17,00	17,00
0,38 mm	28,00	32,00

3. A jóléti társadalom egyes termékei

A rendkívüli hajlékonyságot eredményező szuperrugalmasság miatt közkedvelt alapanyagnak számítanak az alakemlékező ötvözetek a női öltözködés több területén: a speciális hajformázó eszközök, fejhallgatópántok, valamint a cipőtalpak, melltartók merevítőbetétei készülnek ezekből az anyagokból. Az utóbbi termék műanyagbevonatot kap, és határozottan jobb komfortérzetet biztosít – a felmérések szerint.

Biztonsági vízelzáró szerelvények készülnek alakemlékező ötvözetből, amelyek a forró vizet azonnal elzárják, ha annak hőmérséklete meghalad egy meghatározott értéket (44-49 °C). A forróvízvezetékű gőzcsapdák bimetalállal működött változatainak nagy hátránya, hogy a bimetal lineárisan válaszol a hőhatásra. Ezt kiűszöböli ki a memóriafém, amely tiszta alakváltozási ciklust produkál. Ugyanezen előnye miatt alkalmazzák elterjedten a hűtő-szellőző rendszerek, ventilátorok légtérelőinek nyitására-zárására az épületeknél és az autók hűtőrendszereiben [15].

Ugyancsak a biztonsági eszközök közé tartoznak a biztonsági gázszelepek, az ARGB/KVGB (Royal Association of Belgian Gas Specialists) és az SSIGE (Société Suisse de l'Industrie du Gaz et des Eaux) termékei, amelyek a kritikus hőmérséklet-változáskor emberi erővel kinyithatatlanul lezárják a vezetéket [15]. A PROTEUS-csukló a tűzvédelmi rendszerek hőérzékelőjében válthatja fel a kiolvadó betéteket [15]. Előnye, hogy gyors, megbízható és újra felhasználható.

A hagyományos háztartási kenyérpírtók egyik károsodási oka a feledékenység. Az időben ki nem vett pirítós okozta károsodás ellen a Rowenta vezette be a piacra az automatikus katapulttal felszerelt kenyérpírtót. A kritikus hőmérsékletet elérve, egy alakemlékező ötvözetből készült rugó működtette kilököszerkezet gondoskodik a pirítós kivételéről. Ugyancsak egy alakemlékező rugó kapcsolja ki – a forni kezdő víz gőzétől melegítve – az újabb vízforralókat [15].

A sporteszközök terén is jelentős szerepet vívott ki magának az alakemlékező anyagok családja (pl. golfütőfejek, 11. ábra). A horgászkeleknél a szuperrugalmasságuk és a nagy szilárdságuk mellett jól hasznosítható a kiváló korrózióállóságuk is, amely különösen a tengervízben használt keleknél fontos [12]. A vitorlás hajók számos rögzítő- és gyorskioldó szerkezetében is alakemlékező ötvözetből készített reteszekkel, működtetővel cserélték ki a munkahengereket vagy a behúzóvasmagos elektromágneseket.

A berlini műszaki egyetemen olyan repülőgépszárny-modellt fejlesztettek ki, amelynek alakját villamos fűtésre deformálódó alakemlékező huzallal lehet változtatni [16].

4. Orvostechnikai alkalmazások

Az orvostechnikai alkalmazások az alábbi felhasználói tulajdonságokat aknázzák ki:

- termikus alakemlékezés,
- hajlékonyság,
- megtérésnek való ellenállás,



11. ábra: Alakemlékező ötvözetből készült sporteszköz

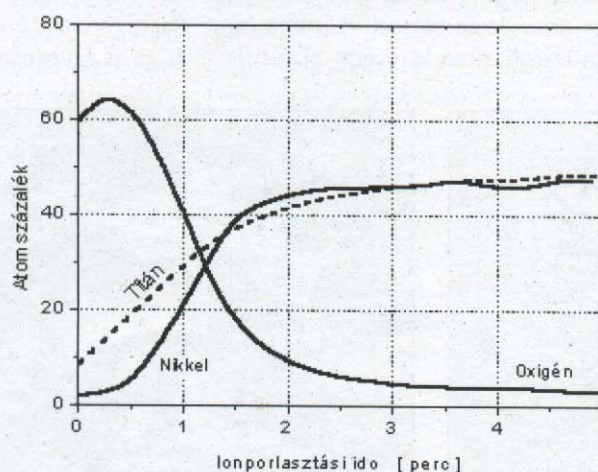
- rugalmas visszalökés,
- állandó terhelés,
- termikus feltágulás,
- rugalmas feltágulás,
- biomechanikai kompatibilitás,
- biokompatibilitás,
- hemokompatibilitás,
- dinamikus interferencia (feszültségi hiszterézis),
- MRI-kompatibilitás.

A nitinol szuperrugalmas tulajdonsága és biokompatibilitása széles körű orvostechnikai alkalmazást tesz lehetővé. A fogászati gyökérkezelő tűknél nagyon hasznos a szilárdság és a hajlékonyság. A nitinol fogszabályozó ívek voltak szinte az első gyakorlati alkalmazásai ennek az anyagnak. Nagy előnye a nitinolnak, hogy a száj hőmérsékletén már ausztenites fázisúvá átalakuló huzalív az egész kezelés során egyenletes feszültséggel nyomja helyére a fogat, mivel széles a rugalmas alakváltozási tartománya [15].

Nitinol sztentek

A sztentek, amelyekről a BKL Kohászat már közölt egy érdekes dolgozatot [18], az emberi test különféle „vezetékeinek”, pl. a koszorúereknek, vénáknak stb. a megerősítésére szolgálnak. Ezeknek a különleges endoprotéziseknek az egyik fontos alapanyaga a nitinol. Komplex mintázatukat általában lézersugaras vágással biztosítják, cső előgyártmányból kiindulva. A felületet elektropolírozzák, így akár az $R_a = 0,1-0,3 \mu\text{m}$ felületi érdesség is elérhető.

A nitinol sztenteket az A_f hőmérséklet fölé hevítve formázzák, majd jeges vízben lehűtve összenyomják, és speciális vezetőhüvelybe helyezik őket. Az érintett érszakaszba vezetve, a hüvelyből kitolva testhőmérsékleten visszanyerik eredeti méretüket [17].



12. ábra. A koncentráció változása az elektropolírozás hatására. A felülettől mért távolság arányos az ionporlasztási idővel

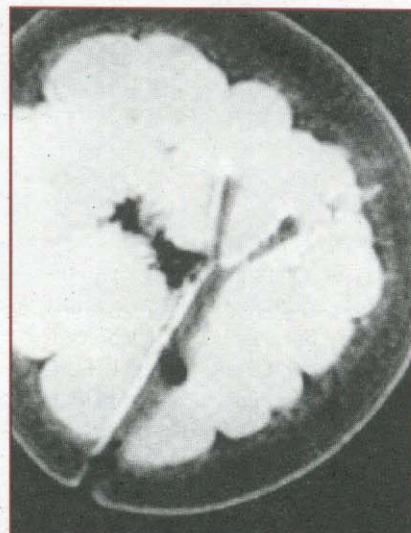
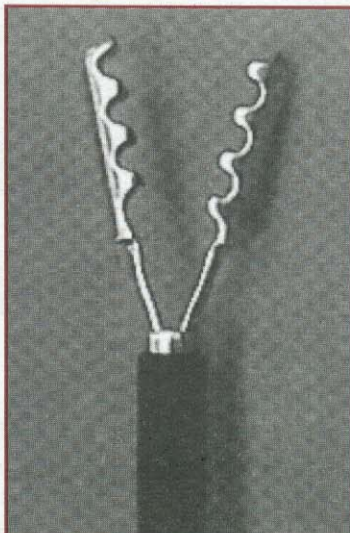
Az elektropolírozás lényegesen jobb minőségű felületet biztosít, de nem egyszerűen csak eltünteti az éleket, csúcsokat, gödröket, hanem lényegében teljesen új felületet hoz létre [17]. Az elektrokémiai folyamat közben a felületen kialakul egy védő oxidfilm, amely kb. 2–5 nm vastagságú, és ez biztosítja a kiváló korróziós ellenállást és biokompatibilitást. A legkülső oxidfilm kémiai összetétele szinte azonos a tiszta titán felületén keletkező TiO_2 rétegével. Ez a jelenség a 12. ábrán látható AES-diagramon (Auger-elektronspektroszkópos mélységi profil) szemléletesen mutatkozik, hiszen a felületen a Ni-tartalom gyakorlatilag nulla [17]. A vezetőd්රótok felületén, a gyémánt húzóköveken való húzáskor kontrollált vastagságú (50–400 nm), nagy ellenállású, sárgásbarna vagy fényes fekete oxidréteget hoznak létre.

Vezetőd්රótok

A vezetőd්රótok a katéteres vizsgálatok fontos kellékei. Az érzőkötelek, érelzáródások valószínű kimutatásának a legbiztosabb fajtája a katéteres érfestés. Ilyenkor a megsűrt érbe a tűn keresztül vezetőd්රótot tolnak, majd a vezetőd්රótra katéttert húznak, a vezetőd්රótot eltávolítva, a katéterbe kontrasztanyagot fecskendeznek nagy nyomással. A szuperrugalmas nitinol lényegesen alkalmasabb erre a célra, mint a rozsdamentes acél vagy a titán, ugyanis szilárdságának, hajlékonyságának és szuperrugalmasságának köszönhetően alakját könnyökképződés nélkül megőrzi az intenzív forgatással, tekeréssel, ki-be húzogatóással járó kezelés közben.

A vezetőd්රótok általában 190 vagy 300 cm hosszúságúak, és 0,014" (350 mikron) átmérőjű huzalból készülnek. Gyakori, hogy az előlő véghez rozsdamentes acélból készült szárat hegesztenek; ilyenkor nitinolból csak az előretolt kb. 400 mm-es szakaszt készítik, amelyen speciális végződést alakítanak ki. 2001-ben a világon többmillió nagyságrendű beavatkozásnál használták ezt az egyébként egyszerűhasználatos eszközt.

Az MRI-kompatibilitás azt jelenti, hogy az MRI-diagnosztika során alkalmazott nagy mágneses tér nem mágnesezi és így „nem mozditja” meg a nitinol implantátumot. A 13. ábra egy nitinolból ké-



13. ábra. Mikrocsipesz (balra) és az MRI-képe grapefruitban

sztített mikrocsipeszt és annak egy grapefruitban látható MRI-képét mutatja [19].

5. Földrengés elleni védelem

Alakemlékező ötvözeteket használtak az 1997. szeptemberi földrengésben megsérült Assisi Szent Ferenc bazilika megerősítésére és földrengés elleni védelmére 1999-ben, majd a trigano-i San Giorgio harangtoronynál is. Ezek volt az első alkalmazásai az alakemlékező anyagoknak a műemlék jellegű mérnöki szerkezetek terén. A korábbiakban merev acélrudakat alkalmaztak az olyan történelmi emlékművek megerősítésére, amelyek szeizmikusan aktív területen épültek meg. Ezeknek az acélrudaknak a védőképessége azonban csak egy bizonyos pontig hatásos, néhány esetben már túl merevnek bizonyultak az erős rengések alkalmával.

Az alakemlékező ötvözetek viszont egyszerre nagy szilárdságúak és hajlékonyak, kiválóan megfelelnek az épületek megerősítésére és a rengések okozta terhelés elviselésére. A megerősítéskor szuperrugalmas alakemlékező kábelekkel kötik össze a timpanon köveit és a tető-

szerkezet elemeit, így növelik az épület egészét összetartó függőleges nyomóerőt. Földrengéskor az így megerősített falazat mozog, elnyelve az energia egy részét, de nem omlik össze [11].

Összefoglalás

Mint az eddigiekből kitűnik, az alakemlékező ötvözetek ipari felhasználása kész ténynek tekintendő. Ebben a tekintetben a legfontosabb ötvözetek a Ni-Ti ötvözetek és a Cu-alapú ötvözetek (Cu-Al-Ni, Cu-Zn-Al). Különösen Japánban foglalkoznak intenzíven az alakemlékező acélok (Cr = 5–13%, Ni < 10%, Mn < 15%, Si < 7%) kutatásával. Előtérbe került a nagy hőmérsékleten alkalmazható anyagok kutatása is, e téren a cirkónium-oxid alapú kerámiák (kb. 880 °C), az 1100 °C-ig használható Nb-Ru, az 1400 °C-ig működő Ta-Ru ötvözetek [20] tekinthetők a legérdekesebb eredményeknek, de ezekre itt nincs mód kitérni, miként az autóipari [21], mikroelektronikai [22] stb. alkalmazásokra, nem beszélve számos izgalmas elméleti kérdéskörrel (kifáradás, öregedés, hőkezelés stb.), amelyhez

2. táblázat

Az alakemlékező ötvözetek fő típusai és alkalmazási területeik

Kód	Ap	Af	Összetétel (tömeg-%)	Jellemző alkalmazási területek
S	-5 – 15 °C	10 – 20 °C	~ 55,8 Ni, a maradék Ti	ortopédiai és sebészeti eszközök, fogszabályozó huzalívek, telefonantennák vezetőhuzalok, tágitók
N	-20 – -5 °C	0 – 20 °C	~ 56,0 Ni	sztentek, hajformázók, finomhuzalok
C	-20 – -5 °C	0 – 10 °C	~ 55,8 Ni, 0,25 Cr	sztentek, szűrők
B	15 – 45 °C	20 – 40 °C	~ 55,6 Ni	működtetők, demórúgók, játékok
M	45 – 95 °C	45 – 95 °C	~ 55,1–55,5 Ni	működtetők
H	>95 °C	95 – 115 °C	< 55,0 Ni	

Az Ap az a hőmérséklet, amelyen hevítéskor 50% ausztenit jön létre

Az S, N és C jelű ötvözeteket szuperrugalmas állapotban alkalmazzák. Az M és H jelű ötvözetekből készítik a tipikus alakemlékező alkatrészeket. A „B” ötvözet mindkét feladatra egyaránt megfelel.

hasznos nyomtatott és elektronikus források állnak rendelkezésre, pl. [23].

Befejezésképpen, a 2. táblázatban összefoglaljuk a legfontosabbnak tekinthető alakemlékező ötvözet, a nitinol fő típusait és alkalmazási területeit [24].

Köszönetnyilvánítás

Köszönetünket fejezzük ki a cikkben közölt adatok összegyűjtéséhez nyújtott segítségükért *Beke Dezsőnek* (Debreceni Egyetem), *Molnár Bélának* (Csepeli Fém-mű Rt.), *Pető Árpádnak* (Graphisoft Rt.), *Prohászka Jánosnak* (MTA-BME FTKCS) és *Tranta Ferencnek* (Miskolci Egyetem).

Irodalom

- [1] Ölander, A.: J. Amer. Chem. Soc., 56 (1932) 3819.
- [2] Chang, L. T. – Read, T. A.: Trans. AIME, 189 (1951) 47
- [3] Buechler, W. J. – Gilfrich, J. W. – Wiley, R. C.: J. Appl. Phys., 34 (1963) 1475.
- [4] Cohen, M. – Olson, G. B.: Classical and Nonclassical Mechanisms of Martensitic Transformations, 1982.
- [5] Prohászka J. – Kristyákné Maróti G.: Alakemlékező ötvözetek, Kohászat 121

- (1988) 290.
- [6] Hornbogen, E. – Mertmann, M.: „Intelligens” anyagok, kompozitok és rendszerek, Kohászat, 130 (1997)
- [7] Káldor M. – Hidasi B.: A martenzites átalakulás szerepe az alakemlékezés jelenségében. BKL Kohászat, 1997/8–9. 267–271.
- [8] <http://www.hszk.bme.hu/~tl205/sma.htm>
- [9] Patoor, E. – Bervellier, M.: Technologie des alliages à memoire de forme, Hermes, Paris, 1994.
- [10] Dewar, S.: Applications d'alliages à mémoire de forme en robotique, 1998, www.eivd.ch/iai/lara/old/robotique/divers/amf/semestre/amf.htm
- [11] Jacquemin, Ch.: Des alliages à mémoire de forme pour la protection sismique de la basilique italienne Saint-François d'Assise, 28 septembre 1999, <http://www.automatesintelligents.com/labo/1999/sep/alliage.html>
- [12] <http://www.metatech.co.kr/>
- [13] http://www.seletronic.fr/produits/ROBOTIQUE/flexinol/body_flexinol.htm
- [14] <http://ranier.hq.nasa.gov/>

- <http://www.amtbe.com>
- [16] <http://www.thermodynamik.tu-berlin.de/english/SMA/wing/wing.html>
- [17] <http://www.nitinol.de/products/>
- [18] Puskás Zs. – Major L.: Ausztenites acélból készült sztent érprotézisek felületi jellemzőinek és bevonatainak vizsgálata. BKL Kohászat, 2001/5. 191–196.
- [19] <http://www.nitinol.com/>
- [20] Fonda, R. W. – Jones, H. N. – Vandermeer, R. A.: The Shape Memory Effect in Equiatomic TaRu and NbRu Alloys, Scripta Materialia, 39 (1998), 1031.
- [21] Stöckel, D.: Shape Memory actuators for automotive applications, in.: Engineering Aspects of Shape Memory Alloys, T. W. Duering (szerk), 1990,
- [22] Ishida, A.: Microstructure and Mechanical Properties of Sputter-Deposited Ti-Ni Alloy Thin Films, Journal of Engineering Materials and Technology, 121 (1999) 2.
- [23] Otsuka, K. – Wayman, C. M. (szerk.): Shape Memory Materials, Cambridge University Press, 1998.
- [24] www.sma-inc.com

A kompozitok és a American Airlines 587-es járata



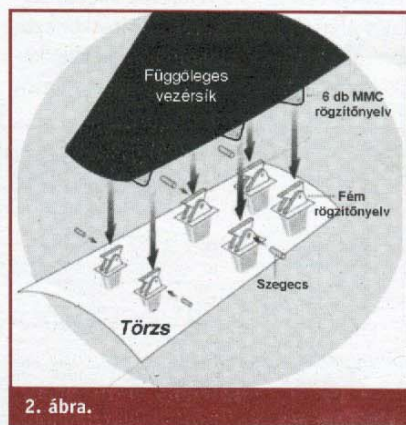
1. ábra.

2001. november 12-én lezuhant az American Airlines 587-es járata, nem sokkal azt követően, hogy felszállt a Kennedy Nemzetközi Repülőtérrel New York-ban. Pár nap múlva megtalálták az Airbus A-300 típusú repülőgépet csaknem érintetlen függőleges vezérsíkját a Jamaica öböl közelében. A megkezdett vizsgálat erre a kompozitszerkezetre fókuszált: játszott-e valamilyen szerepet a kompozitanyag a repülőgép lezuhanásában.

A kompozitok vizsgálata igen speciális szakterület. Annak ellenére, hogy a repülőgépgyártók régóta használják ezt az anyagot, a National Transportation Safety Board-nak (NTSB) nincs egyetlen kompozitszakértője sem. A további információk forrásai olyan kezdő és szakértő repülőgéptervezők, akik e szomorú katasztrófáról véleményt mondtak.

Az Airbus A-300 függőleges vezérsíkja egy réteges, karbonszálas epoximátrixú kompozit. A rétegszétválás (delamination) jellegű repedéseket egyre gyakrabban említik a szakirodalom új dolgozatai. A réteges műanyagok rétegeinek szétválását, ill. széthasadását a szerkezeti anyag fizikai károsodása vagy a ragasztóréteg tapadásának leromlása okozza.

Az NTSB készítette fényképeken egyértelműen megmutatkozik a károsodás, bár ezek nagy része akkor keletkezett, amikor a farok leszakadt. Számos cikk megállapította már, hogy a kompozit kifáradása nem hasonlít a re-



2. ábra.



3. ábra.

pülőgépek hagyományos szerkezeti anyagának, az alumíniumnak a kifáradásához. A roncsolásmentes vizsgálatok kopogtatásból, ultrahangos és egyéb repedéskereső vizsgálatból állnak.

Az 1. ábrán látható a gép vázlata. Az ezen bekarikázott részt mutatja kinagyítva a 2. ábra: a függőleges vezérsík (farok) rögzítési vázlatán látható szálerősítéses fémmátrixú kompozitból (MMC) készített rögzítőnyelvek szétszakadtak, és a farok elszakadt. Ennek kiemelését mutatja a 3. ábra. A szegecskötések a géptörzshöz maradtak. A katasztrófa 265 emberéletet követelt.

<http://composite.about.com/library/bl587.htm>

<http://www.nytimes.com/2001/11/15/nyregion/15CRAS.html>